

Eduardo da Silva Pino

**Projeto de sistema de posicionamento indoor por análise de cena em rede IEEE 802.15.4.**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica  
Orientador: Prof. Dr. Carlos Montez

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pino, Eduardo da Silva

Projeto de sistema de posicionamento indoor por  
análise de cena em rede IEEE 802.15.4. / Eduardo da  
Silva Pino ; orientador, Carlos Montez , 2018.  
60 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,  
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

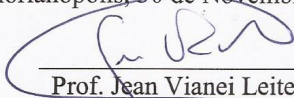
1. Engenharia Elétrica. 2. Posicionamento  
Indoor. 3. Análise de Cena. 4. IEEE 802.15.4. I. ,  
Carlos Montez. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

Eduardo da Silva Pino

**Projeto de sistema de posicionamento indoor por análise de cena em rede IEEE 802.15.4.**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora

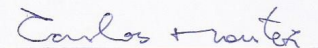
Florianópolis, 30 de Novembro de 2018.



Prof. Jean Vianei Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal de Santa Catarina

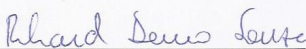
**Banca Examinadora:**



Prof. Carlos Montez, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Richard Demo Souza, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr.

Instituto Federal da Santa Catarina



Este trabalho é dedicado aos meus  
amigos, namorada e à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Norton e Valdete, que sempre me deram muito carinho, incentivo e educação, e minha irmã Fernanda, que sempre torceu por mim. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Montez, pela atenção e orientação dada durante o desenvolvimento do trabalho, sem os quais este não seria possível. Um agradecimento especial à Alexandra Asanovna Elbakyan, por acreditar na ciência aberta e acessível a todos. Por fim, agradeço a minha namorada, Fernanda e meus amigos, pelas risadas e conversas, que tornaram estes anos de graduação, não só anos de desenvolvimento profissional, mas também de desenvolvimento pessoal.



## RESUMO

Apesar dos avanços na tecnologia GPS de posicionamento global, a localização em ambientes fechados ainda se mostra como um problema relevante. Tecnologias e técnicas distintas possuem vantagens em determinadas situações, porém nenhuma sobressai como solução definitiva. Algoritmos de localização por análise de cena, que mapeiam previamente os níveis de sinais do ambiente, vêm fornecendo ótimos resultados, sendo as principais soluções, atualmente, baseadas em redes IEEE 802.11. Em ambientes onde não há este tipo de infraestrutura de rede disponível, ou onde requisitos de custo, área de alcance e consumo de energia limitam a aplicação dessas redes, outras tecnologias devem ser utilizadas. Como alternativa, o presente trabalho apresenta um projeto de sistema de posicionamento indoor implementado em uma rede IEEE 802.15.4. O sistema proposto obteve bons resultados, apresentando erro médio de 0.6 m nas estimativas de posição em um cenário real. No entanto, apesar da boa precisão, foram identificados diversos desafios de implementação e escalabilidade do sistema.

**Palavras-chave:** Posicionamento Indoor. Análise de Cena. IEEE 802.15.4



## **ABSTRACT**

Despite advances in GPS technology for global positioning, indoor positioning still proves to be a significant problem. Different technologies and techniques have advantages in certain situations, but none stand out as a definitive solution. Scene analysis-based positioning algorithms, which previously maps the signal levels of the environment, have provided great results. Currently, the main solutions are based on IEEE 802.11 networks. In environments where this type of network infrastructure is not available, or where requirements for cost, power consumption and range limit the application of such networks, other technologies may be used. As an alternative, this paper presents the project of an indoor positioning system implemented in an IEEE 802.15.4 network. The proposed system obtained good results, presenting an average error of 0.6 m in the position estimates in a real scenario. However, despite the good accuracy, several implementation and scalability challenges were identified.

**Keywords:** Indoor Positioning. Scene Analysis. IEEE 802.15.4.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização por trilateração.....	18
Figura 2 - Análise de cena por RSSI .....	21
Figura 3 - RMSE pelo número de NRs.....	23
Figura 4 - RMSE pela distância dos pontos.....	24
Figura 5 - RMSE pelo número de amostras por ponto .....	24
Figura 6 - RMSE pelo expoente de perdas de propagação $\alpha$ ....	25
Figura 7 - Ilustração da análise de cena por RSSI .....	26
Figura 8 - Estimando posição com KNN.....	27
Figura 9 - Arquitetura de um dispositivo IEEE 802.15.4 .....	30
Figura 10 - Topologias de rede IEEE 802.15.4 .....	31
Figura 11 - Topologia de árvore de clusters .....	32
Figura 12 – Representação da topologia do sistema.....	33
Figura 13 - Diagrama do hardware dos nodos de referência .....	34
Figura 14 – Diagrama do hardware do nodo móvel .....	34
Figura 15 - Algoritmo de medição de RSSI .....	35
Figura 16 - Algoritmo de calibração.....	37
Figura 17 - Exemplo de Matriz de calibração .....	37
Figura 18 - Algoritmo de Predição .....	38
Figura 19 - RSSI filtrado por EWMA. ....	39
Figura 20 - Influência do parâmetro k no algoritmo.....	40
Figura 21 - Cenário de Testes.....	41
Figura 22 - Nodos de Referência.....	42
Figura 23 - Nodo Móvel .....	42
Figura 24 - Erro sobre predição dos pontos de teste.....	43
Figura 25 - Influência dos nodos de referência .....	44
Figura 26 - Influência do número de pontos de calibração.....	44
Figura 27 - Estimativas de posição ao longo do percurso .....	45
Figura 28 - Medição do período de amostragem do sistema .....	46

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características de RF do padrão IEEE 802.15.4 .....	28
Tabela 2 - Especificações dos dispositivos .....	35
Tabela 3 - Uso de memória do Arduino UNO Ver.3 .....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AP - Access Point  
FFD - Dispositivo de função completa  
GPS - Global Positioning System  
IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos  
IPS - Indoor Positioning System  
KD tree - Árvore binária K-dimensional  
KNN - K Nearest Neighbors  
LQI - Indicador de qualidade de Link RF  
LR-WPAN – Low Rate Wireless Personal Area Network  
MAC – Medium Access Control layer  
NM – Nodo de rádio móvel  
NN - Nearest Neighbors  
NR – Nodo de rádio de referência  
PAN - Personal Area Network  
PHY – Physical layer  
PWM - Pulse Width Modulation  
RF - Radiofrequência  
RFD - Dispositivo de função reduzida  
RMSE - Root Mean Squared Error  
RSSI - Received Signal Strength Indicator  
SNR - Signal to Noise Ratio  
TDOA - Time Difference of Arrival  
TOA - Time of Arrival  
WKNN - Weighted K Nearest Neighbors  
WSN - Wireless Sensor Network



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.2	Objetivos Específicos.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Trilateração .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Análise de Proximidade .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Análise de Cena .....</b>	<b>20</b>
2.2	POSICIONAMENTO POR ANÁLISE DE RSSI.....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Número de rádios de referência.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Número de pontos de calibração.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Propagação de onda e ruídos .....</b>	<b>25</b>
2.3	K-NEAREST NEIGHBORS.....	26
2.4	IEEE 802.15.4.....	28
<b>2.4.1</b>	<b>Características básicas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Dispositivos IEEE 802.15.4.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Arquitetura IEEE 802.15.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Topologias .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>PROJETO DE SISTEMA DE POSICIONAMENTO .....</b>	<b>33</b>
3.1	Arquitetura do Sistema.....	33
3.2	Etapa Off-line ou Calibração .....	36
3.3	Etapa Online.....	38
3.4	Metodologia Experimental.....	41
<b>4</b>	<b>TESTES PRÁTICOS E RESULTADOS .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Apesar dos avanços na tecnologia GPS de posicionamento global, a localização, ou posicionamento, em ambientes internos ainda representa um desafio. Sistemas de posicionamento indoor (IPS – *Indoor positioning systems*) encontram utilidade nas mais variadas áreas, desde robótica, com o auto posicionamento de robôs autônomos móveis (THRUN, 2000), até na área da saúde com o rastreamento de pacientes, funcionários e equipamentos em hospitais (LIU et al., 2007). Entretanto, obter informações de posição em ambientes internos é particularmente desafiador por várias razões: desvanecimento por multipercurso, falta de linha de visada direta e maior densidade de obstáculos que causam alta atenuação e espalhamento de sinal.

Tecnologias e técnicas distintas possuem vantagens em determinadas situações, porém nenhuma sobressai como solução definitiva. Uma das técnicas de posicionamento indoor que vem ganhando destaque é a chamada análise de cena, que se baseia na observação de características do espaço para estimar uma posição, sendo independente de visada direta e proporcionando bons resultados mesmo em ambientes com muitos obstáculos (MOGHATAIEE; DEMPSTER, 2014). Diversas soluções de posicionamento indoor por análise de cena têm sido propostas nos últimos anos, sendo a maioria baseada em redes IEEE 802.11 devido à sua grande presença em áreas urbanas. Em ambientes onde não há este tipo de infraestrutura disponível, ou onde requisitos de custo, área de alcance e consumo de energia limitam a aplicação dessas redes, outras tecnologias devem ser utilizadas.

Em 2003, o IEEE aprovou o padrão 802.15.4 que define a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY) para redes de área pessoal sem fio de baixa taxa de dados (LR-WPAN). O padrão IEEE 802.15.4 é projetado para interconectar sensores, atuadores e dispositivos de processamento de baixo custo, que podem compor uma infraestrutura para detectar o ambiente físico.

A especificação abrange apenas as camadas PHY e MAC, portanto camadas de nível superior e subcamadas de interoperabilidade não estão definidas no padrão. Especificações, como 6LoWPAN, SNAP, Thread, ZigBee e outras especificações proprietárias, baseiam-se neste padrão. A combinação do padrão IEEE 802.15.4 e de camadas superiores permite definir uma pilha de protocolos capaz de suportar uma variedade de necessidades, como por exemplo, localização em redes de sensores sem fio.



Uma rede de sensores sem fio, ou *wireless sensor network* (WSN), é uma rede formada por um grande número de nodos de rádio, onde cada elemento é equipado com um sensor para detectar fenômenos físicos. WSN encontram aplicações nos mais diversos setores, de sistemas de defesa até agricultura de precisão.

O padrão IEEE 802.15.4 é geralmente considerado um dos protocolos mais adequados para WSNs no campo industrial, já que permite comunicações de baixa potência e baixo consumo de energia (TOSCANO; LO BELLO, 2012).

Motivado pela crescente presença de redes de sensores sem fio em diversos setores da indústria e pelos promissores resultados da técnica de localização por análise de cena, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de localização indoor baseado em IEEE 802.15.4.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo projetar e implementar um sistema de posicionamento em ambiente interno por análise de cena em rede IEEE 802.15.4. Este sistema deve ser capaz de rastrear e mapear o percurso realizado por um objeto móvel em ambiente indoor.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento dos principais parâmetros de projeto de sistemas de posicionamento por análise de cena e suas influências no desempenho e acurácia da técnica.
- Implementar em um microcontrolador um algoritmo de análise de cena baseado em *weighted k-nearest neighbors* com filtro digital para suavizar medições de RSSI.
- Projetar e implementar um sistema de posicionamento em um cenário real através de rede IEEE 802.15.4.
- Realizar testes em um cenário real para validar a solução e identificar os principais desafios do uso de análise de cena para posicionamento em redes IEEE 802.15.4.

## **2 REVISÃO TEÓRICA**

### **2.1 TÉCNICAS DE POSICIONAMENTO**

Sistemas de posicionamento, ou localização, são aqueles cuja função é determinar a posição de um objeto no espaço. Dependendo da aplicação, diferentes tipos de informação de posicionamento são utilizadas, algumas mais detalhadas e outras até mesmo em linguagem natural. Os principais tipos são posição física, posição simbólica, posição absoluta e posição relativa (LIU et al., 2007).

Posição física é expressa na forma de coordenadas que identificam um ponto em um plano ou no espaço. Já a posição simbólica expressa a localização em linguagem natural, usando expressões como, “no escritório” ou “em Florianópolis”. Posição relativa é normalmente baseada na proximidade de um ponto de referência conhecido, enquanto que posição absoluta usa um grid de referência compartilhado por todos os objetos localizados.

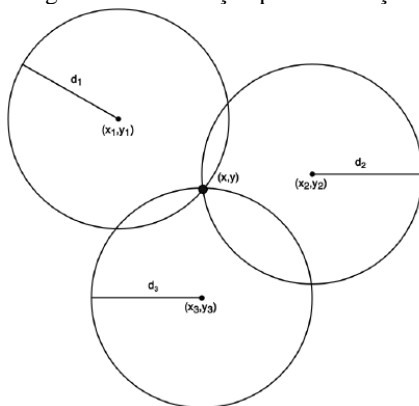
Sistemas de posicionamento também podem ser classificados conforme a técnica utilizada, sendo as principais técnicas: trilateração, análise de cena e análise de proximidade.

#### **2.1.1 Trilateração**

A trilateração por radiofrequência estima a posição de um objeto medindo sua distância à múltiplos rádios de referência. Pode-se medir a distância indiretamente a partir da atenuação de sinal, ou ainda, pode-se calcular a distância a partir do tempo que uma onda de rádio leva para viajar de um ponto à outro.

Sabendo-se a posição de três ou mais rádios de referências e a distância entre eles e um rádio móvel no espaço, podemos calcular a posição do nodo móvel através de um sistema de equações.

Figura 1 - Localização por trilateração



Fonte: Silver, 2016.

Ao definir a posição de cada rádio de referência como o centro de uma esfera no espaço, ou um círculo no plano, onde o raio é a distância do alvo à cada uma das referências, pode-se calcular a posição do alvo encontrando o ponto onde as esferas ou os círculos se encontram. Por sua simplicidade, essa técnica é bastante utilizada, sendo implementada com diferentes métodos para determinar distâncias. A seguir serão apresentadas alguns desses métodos.

#### Método TOA (Time of arrival):

A distância do alvo móvel à um rádio de referência é proporcional ao tempo de propagação de uma onda de rádio entre os dois pontos. O tempo de propagação pode ser calculado a partir da diferença entre o instante em que a onda é enviada pelo transmissor e o instante em que ela chega ao receptor.

Para sistemas baseados em “tempo de chegada”, do inglês *Time of Arrival* (TOA), o tempo de propagação unidirecional é medido e a distância entre a unidade de medição e a de referência é calculada. Em geral, o TOA direto resulta em dois problemas. Primeiro, todos os transmissores e receptores do sistema precisam ser precisamente sincronizados. Segundo, um *timestamp* deve ser rotulado no sinal de transmissão para que a unidade de medição possa discernir a distância percorrida pelo sinal.

### Método TDOA (Time difference of arrival):

*Time Difference of Arrival* é um pouco mais versátil que TOA. Este método não requer o instante em que o sinal foi enviado, somente o instante em que o sinal foi recebido e a velocidade que o sinal viaja. Quando o sinal é recebido em duas ou mais unidades de referência, a diferença no tempo de chegada pode ser usada para calcular a diferença nas distâncias entre o alvo e os pontos de referência. Essa técnica no entanto, não elimina a necessidade de sincronização de relógios e ainda introduz a necessidade de comunicação entre os nodos de rádio de referência.

### Método RSSI (Received Signal Strength Indicator):

As técnicas anteriores exigem linha de visada direta entre emissor e receptor, algo raro em um ambiente fechado. O método RSSI consiste em medir a atenuação que uma onda de rádio sofre ao se propagar no espaço. *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), ou indicador de intensidade do sinal recebido, é uma medida do nível de potência de uma mensagem recebida por um receptor de rádio.

A relação entre a potência recebida e a distância percorrida pelo sinal é dada por:

$$\text{RSSI [dBm]} = -10n \log_{10} (d) + A \text{ [dBm]}$$

Sendo que A descreve a medição de RSSI à 1 metro do transmissor e n descreve a atenuação média do ambiente. Para a estimativa de distância, resolvendo a equação em d, obtém-se:

$$d = 10^{\frac{\text{RSSI}-A}{-10n}}$$

Em linha de visada direta, n é igual a 2. Mas para caminhos com obstruções, n tem um valor entre 4 e 5 (BOSE; FOH, 2007).

Além de não depender de linha de visada direta essa técnica não exige a sincronização de relógios.

## 2.1.2 Análise de Proximidade

Essa técnica fornece informação simbólica e relativa da localização de um objeto. Normalmente ela é implementada através de um grid de nodos de rádios de referência, com posições conhecidas (LIU et al., 2007). Quando o sinal é detectado por um único nodo de referência, a unidade móvel é considerada estar na posição daquele nodo.

Quando mais de um nodo de referência detecta o sinal, a posição é estimada como sendo a do nodo que possui o sinal mais forte.

### **2.1.3 Análise de Cena**

No posicionamento por análise de cena inicialmente são coletadas características de um ambiente, geralmente valores de RSSI, e na sequência estima-se a localização de um objeto combinando as medições feitas em tempo real com as medições realizadas a priori em uma etapa de calibração.

Essa técnica, portanto, apresenta duas fases bem distintas, a fase off-line e fase online. Na fase off-line, características do ambiente são coletadas em todo o espaço de maneira manual. O projetista percorre todo o ambiente, efetuando medições e marcando as posições no espaço onde foram realizadas. Durante a fase online, o objeto móvel realiza novas leituras do ambiente e insere esses novos dados em um estimador, construído na etapa off-line, que estima a posição do objeto em função das características medidas. O modelo estimador pode ser construído utilizando-se diversos métodos, como métodos probabilísticos, redes neurais e técnicas de reconhecimento de padrões (LIU et al., 2007).

As principais vantagens desse tipo de técnica em relação as demais apresentadas são, maior robustez em relação à desvanecimento de multi-percurso e o fato de não depender de atributos espaço-temporais, como tempo de propagação e ângulo de recepção de sinal, que são parâmetros altamente susceptíveis a erros em situações onde não há linha de visada direta entre os nodos de rádios na rede.

As principais desvantagens são os requisitos de memória para armazenamento de dados e os esforços humanos necessários para realizar o estágio de treinamento no ambiente de operação (MOGHTADAIEE; DEMPSTER, 2014).

Em razão de suas vantagens e dos bons resultados que vêm apresentando em diversas soluções acadêmicas e comerciais de posicionamento indoor, a técnica de análise de cena foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho. Na seção a seguir, a técnica será apresentada em maiores detalhes.

## 2.2 POSICIONAMENTO POR ANÁLISE DE RSSI

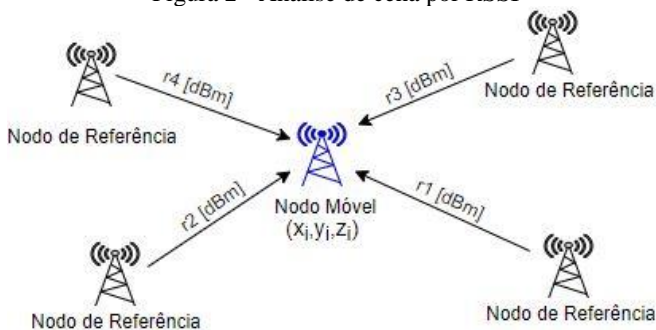
O aumento da utilização das redes locais sem fio abriu uma nova oportunidade para serviços de posicionamento. Embora essas redes não tenham sido projetadas para este fim, elas podem ser usadas para estimar a localização de um objeto explorando o valor do indicador de intensidade do sinal recebido. A relação sinal-ruído (SNR) também pode ser usada, mas é frequentemente omitida porque o RSSI tem uma correlação mais forte com a localização do que o SNR (BAHL; PADMANABHAN, 2000).

Na análise de cena por RSSI, uma posição é estimada pela comparação entre valores de RSSI medidos em posições desconhecidas e valores medidos em posições conhecidas e organizados em uma matriz que relaciona as medições com a posição onde estas foram realizadas.

Essa matriz, chamada de matriz de calibração, é construída na fase off-line a partir dos RSSIs de sinais de rádio enviados pelos nodos de rádio de referência (NRs). Esses nodos de rádio são instalados em posições conhecidas e tem como função transmitir sinais de rádio de referência, a partir dos quais os RSSIs serão medidos.

A construção da matriz de calibração começa selecionando os pontos no espaço onde serão realizadas as medidas, chamados pontos de calibração. Os valores de RSSI das ondas transmitidas por rádios de referência são coletados nos pontos de calibração, conforme representado na figura, e armazenados na matriz.

Figura 2 - Análise de cena por RSSI



Fonte: Autor (2018)

A  $i$ -ésima linha da matriz tem a forma:

$$[r_{i1} \ r_{i2} \ \cdots \ r_{ij} \ x_i \ y_i \ z_i], i = 1, 2, \dots, M$$

onde  $r_{ij}$  é a medida de RSSI referente ao  $j$ -ésimo rádio de referência e realizada sobre o  $i$ -ésimo ponto de calibração, enquanto que  $x_i, y_i, z_i$  são as coordenadas do  $i$ -ésimo ponto de calibração.

A matriz de calibração pode ser modificada ou processada antes de aplicá-la na fase online. A motivação para isto pode ser a redução dos requisitos de memória ou ainda o tratamento de ruídos nas medidas.

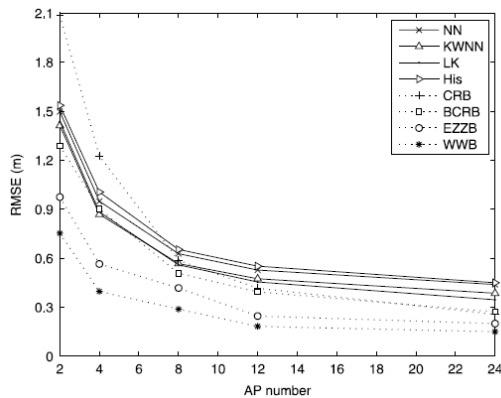
A quantidade de pontos de calibração, rádios de referência, medidas de RSSI em cada ponto e outros parâmetros de propagação de onda têm grande influência no desempenho da técnica.

Moghtadaiee e Dempster (2014) desenvolveram em seu trabalho, *Design protocol and performance analysis of indoor fingerprinting positioning systems*, uma análise completa da influência de diversos parâmetros de projeto de sistemas de análise de cena. Foram avaliados diferentes estimadores como, histograma (His), *nearest neighbor* (NN), *weighted k-nearest neighbors* (WKNN), e *linear kernel* (LK), e também diferentes modelos de limites inferiores, ou *lower bounds*, para avaliar qual modelo melhor representa o limite de desempenho dos estimadores. O trabalho foi desenvolvido considerando o padrão IEEE 802.11 como meio físico onde os rádios de referência são os pontos de acesso (*APs* – *Access Points*) da rede Wi-Fi.

### 2.2.1 Número de rádios de referência.

O número de rádios de referência e a geometria da disposição desses nodos no ambiente são fatores de grande impacto na precisão da estimativa de posição. Moghtadaiee e Dempster (2014) observaram o aumento da precisão de diversas técnicas de estimação com o aumento do número de pontos de acesso, uma vez que mais informações estão disponíveis em todos os pontos do espaço. A melhoria na precisão é mais intensa para números mais baixos de APs, enquanto para números mais altos, a adição de APs não afeta consideravelmente a precisão.

Figura 3 - RMSE pelo número de NRs



Fonte: Moghtadaiee e Dempster, 2014.

A Figura 3 apresenta a influência do número de rádios de referência, ou pontos de acesso (AP), em diferentes técnicas de estimação e modelos teóricos. A análise foi feita com base nas curvas da raiz do erro médio quadrático (RMSE) observado para cada técnica em função do número de APs.

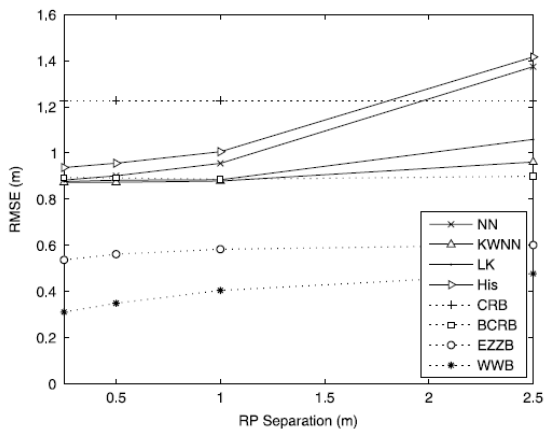
Em outro estudo, T. King, T. Haenselmann e W. Effelsberg mostram em (KING et al., 2006) que a precisão melhora 33% ao aumentar de um para dois o número de pontos de acesso no ambiente. Ao se aumentar de dois para três, ganha-se mais 20%. A partir disso os ganhos são marginais, seguindo uma tendência logarítmica. No mesmo trabalho foi demonstrado que a disposição dos APs no espaço também tem peso na precisão dos métodos, onde maior diversidade espacial no arranjo dos APs pode melhorar o desempenho.

### 2.2.2 Número de pontos de calibração

O número de pontos de calibração, assim como a disposição geométrica desses pontos, também são parâmetros importantes para um bom desempenho da análise de cena. Intuitivamente pode-se concluir que a quantidade e qualidade de dados é fundamental para a derivação de bons estimadores, portanto um maior número de pontos de reflete em melhores previsões de posição. A Figura 4, apresenta a influência da distância entre cada ponto de calibração. Observa-se que, quanto mais próximos os pontos, menor é o valor de RMSE para todas as técnicas experimentadas.



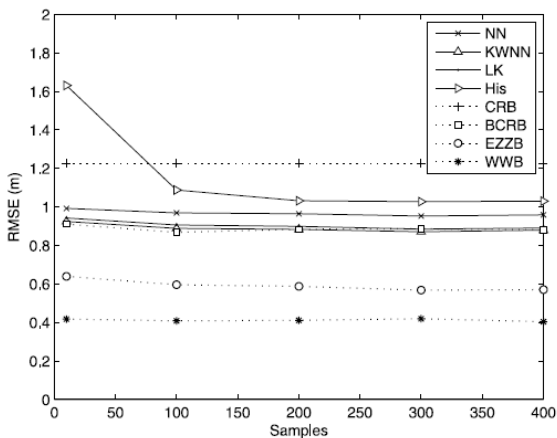
Figura 4 - RMSE pela distância dos pontos



Fonte: Moghtadaiee e Dempster, 2014.

Quanto ao número de amostras de RSSI em cada ponto de calibração, no mesmo estudo foi mostrado que, com exceção da análise por histograma, as demais técnicas sofrem pouca influência no número de amostras por ponto, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - RMSE pelo número de amostras por ponto



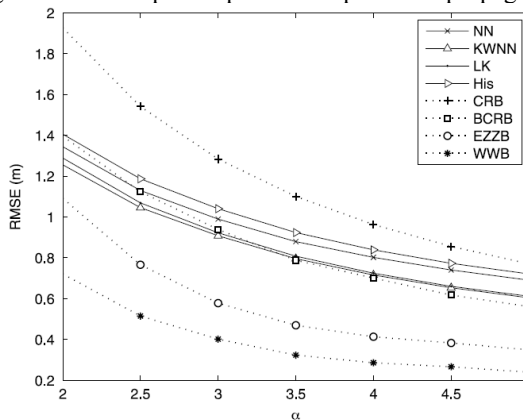
Fonte: Moghtadaiee e Dempster, 2014.

### 2.2.3 Propagação de onda e ruídos

Naturalmente, um sistema de posicionamento por rádio depende das características da propagação de ondas no meio e principalmente da atenuação da onda ao percorrer o espaço. Moghtadaiee e Dempster (2014) observaram, curiosamente, que diferentemente de outras técnicas de localização, a análise de RSSI parece obter melhores resultados quando as perdas por propagação por percurso, ou *Path Loss*, no ambiente são maiores.

A Figura 6 mostra que valores mais altos do expoente de perdas de propagação  $\alpha$ , resultam em maiores precisões porque quando o sinal se atenua muito com a distância, até dois pontos próximos têm valores de RSSI muito diferentes que os tornam mais diferenciáveis.

Figura 6 - RMSE pelo expoente de perdas de propagação  $\alpha$



Fonte: Moghtadaiee e Dempster, 2014.

Um estudo aprofundado das propriedades do RSSI foi realizado (KAEMARUNGSI; KRISHNAMURTHY, 2012), onde foram analisados resultados práticos de medições de RSSI sob diversos cenários. Os resultados indicam que os erros em estimativas de posições são proporcionais ao aumento do desvio-padrão do RSSI, portanto é recomendado o uso de filtros para eliminar ruídos e suavizar as medidas.

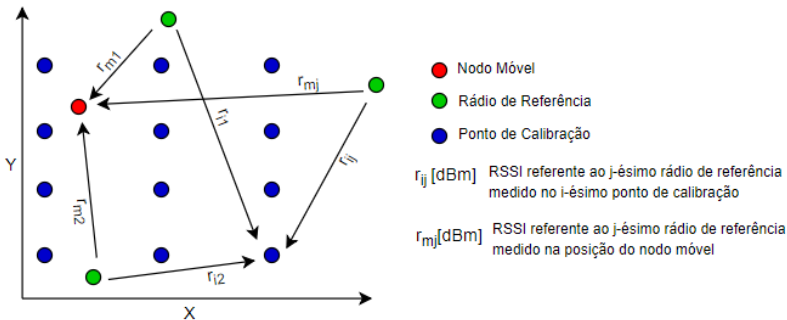
## 2.3 K-NEAREST NEIGHBORS

Diferentes implementações de análise de cena utilizam diferentes estimadores de posição, desde redes neurais e métodos probabilísticos até técnicas de reconhecimento de padrões. Um estimador muito utilizado nesse tipo de análise é o chamado *k-nearest neighbors*.

*K-nearest neighbors* (KNN), ou K vizinhos mais próximos, trata-se de uma das técnicas mais simples de reconhecimento de padrões. Por sua simplicidade é bastante utilizada para estimativa de posição (LIU et al., 2007). A posição é estimada calculando-se a média das k posições conhecidas mais próximas daquela a ser estimada. Para encontrar os k vizinhos mais próximos da posição desconhecida, são os comparados atributos que caracterizam essas posições no espaço, como por exemplo medidas de RSSI. As figuras abaixo ilustram a técnica.

Inicialmente são realizadas medidas de RSSI em relação a cada rádio de referência e construindo vetores que caracterizam cada posição no espaço em relação às referências.

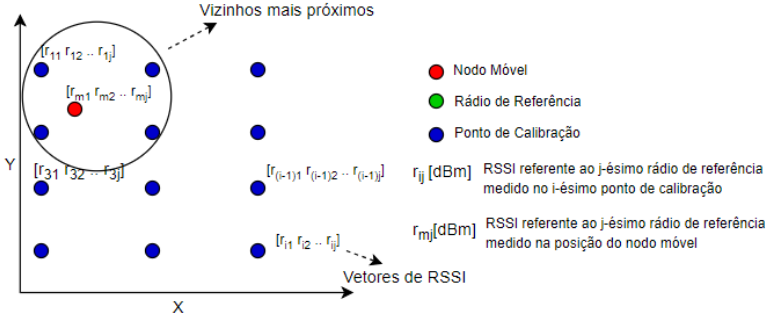
Figura 7 - Ilustração da análise de cena por RSSI



Fonte: Autor (2018)

Em seguida calcula-se a distância euclidiana entre o vetor de RSSI da posição do nó móvel e os vetores de RSSI de todos os pontos de calibração para determinar os k pontos de calibração mais próximos, conforme a Figura 8. Sabendo a posição cartesiana dos k vizinhos mais próximos basta calcular a média das dimensões para estimar a posição do nodo móvel.

Figura 8 - Estimando posição com KNN



Fonte: Autor (2018)

Uma modificação da técnica KNN que tem apresentado bons resultados é a weighted K-Nearest Neighbors (WKNN) cuja proposta é ponderar a média pelo inverso da distância entre os pontos, conforme as equações abaixo.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{x_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{D_i}} \quad y = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{y_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{D_i}} \quad z = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{z_i}{D_i}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{D_i}}$$

Sua vantagem é que pontos mais próximos tem maior peso na estimativa.

Uma implementação bastante simples pode ser vista no pseudocódigo abaixo.

Seja  $\mathbf{M}$  uma lista de elementos  $\mathbf{m}_i = \{\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i\}$  onde  $\mathbf{r}_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}\}$  é o  $i$ -ésimo vetor de atributos e  $\mathbf{p}_i = \{x_i, y_i, z_i\}$  sua respectiva posição. Seja  $\mathbf{r}_{novo} = \{r_1, r_2, \dots, r_j\}$  um vetor de atributos de posição desconhecida e  $\mathbf{p}_{novo} = \{x, y, z\}$  sua posição e seja  $\mathbf{M}_{knn}$  uma lista dos  $k$  elementos de  $\mathbf{M}$  com os vetores  $\mathbf{r}$  mais próximos de  $\mathbf{r}_{novo}$ .

**Para cada elemento  $\mathbf{m}_i$  de  $\mathbf{M}$  faz:**

**Calcula** distância euclidiana entre  $\mathbf{r}_i$  e  $\mathbf{r}_{novo}$

**Atualiza**  $\mathbf{M}_{knn}$

**Fim do loop**

**$\mathbf{p}_{novo}$**  = média das posições  $\mathbf{p}$  dos elementos de  $\mathbf{M}_{knn}$

No pseudocódigo, os  $k$  vizinhos mais próximos são encontrados utilizando um algoritmo de busca chamado na literatura de método linear.

Considerado o método mais simples de implementação de KNN, o método busca os  $k$  vizinhos mais próximos calculando diretamente a

distância para cada elemento da matriz de calibração. Para matrizes de calibração pequenas, esse algoritmo pode ser bastante competitivo, no entanto, o tempo de execução do algoritmo é proporcional ao número de pontos de calibração, podendo ser bastante lento em ambientes maiores.

Uma alternativa interessante é o algoritmo *KD tree*, ou árvore k-dimensional. Esse algoritmo reduz o número necessário de cálculos de distância usando a distância relativa entre cada amostra do conjunto de dados, organizando essas informações em uma estrutura de árvore binária. Proposto por Bentley (1975), o algoritmo KD-tree pode ser bastante eficiente para conjuntos com baixa dimensionalidade, podendo ter o tempo de execução na ordem de  $O(\log n)$  onde  $n$  é o número de elementos no conjunto de dados. Para conjuntos com um número de dimensões muito elevado o tempo computacional desse algoritmo se assemelha ao do método linear na ordem  $O(n)$ .

A implementação de um sistema de posicionamento por análise de RSSI usando KNN depende de uma infraestrutura de comunicação por radiofrequência. A seção a seguir apresenta o protocolo IEEE 802.15.4, sobre o qual o sistema será desenvolvido.

## 2.4 IEEE 802.15.4

A norma IEEE 802.15.4 define as especificações de comunicação da camada física (PHY) e da camada de controle de acesso ao meio (MAC) para redes de área pessoal de comunicação sem fio que operam com baixa taxa de transmissão de dados, definidas também pela sigla LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network).

### 2.4.1 Características básicas

A Tabela 1 apresenta as principais características do padrão, como frequências de operação, canais em cada banda, taxa de dados e taxa de símbolos.

Tabela 1 - Características de RF do padrão IEEE 802.15.4

	Faixa de Frequências (MHz)		
	868.3	902-928	2400-2483.5
Número de Canais	1	10	16
Taxa de dados (kbps)	20	40	250
Taxa de Símbolos (ksps)	20	40	62.5
Região Geográfica	Europa	Am. do Norte	Mundial

Fonte: Autor, 2018

O IEEE 802.15.4 trabalha sobre as bandas de frequências denominadas como ISM (Industrial Scientific and Medical) de 868MHz (Europa), 915MHz (EUA) e 2.4GHz (mundialmente).

Na banda de 868MHz existe só um canal e este, embora permita apenas taxa de dados até 20 Kbps, devido à sua baixa frequência, é o que sofre menos perdas de atenuação, permitindo oferecer uma maior área de cobertura. Por sua vez, nas bandas dos 915MHz e 2.4GHz estão disponíveis 10 e 16 canais respectivamente.

Os 16 canais na faixa de frequência de 2,4 GHz recebem números de 11 a 26, onde o usuário pode selecionar um canal diferente para evitar interferência com demais sistemas operando nessa faixa, como por exemplo redes IEEE 802.11b (Wi-Fi). Para garantir a coexistência dos dois padrões é recomendado utilizar o canal 15 em redes IEEE 802.15.4, dado que esse canal não se sobrepõe aos canais das redes Wi-Fi (Larranaga et al., 2010).

#### **2.4.2 Dispositivos IEEE 802.15.4**

O padrão define dois tipos de dispositivos físicos: dispositivos de função completa (FFD) e dispositivos de função reduzida (RFD). Um FFD pode se comunicar com RFDs ou outros FFDs, enquanto um RFD pode se comunicar apenas com um FFD. RFDs são destinados a aplicações extremamente simples, como um interruptor de luz ou um sensor de ocupação; eles geralmente se comunicam com pouca frequência, passando a maior parte do tempo em um estado inativo. Um RFD só pode se associar com um único FFD de cada vez. Consequentemente, o RFD pode ser implementado usando recursos mínimos de memória.

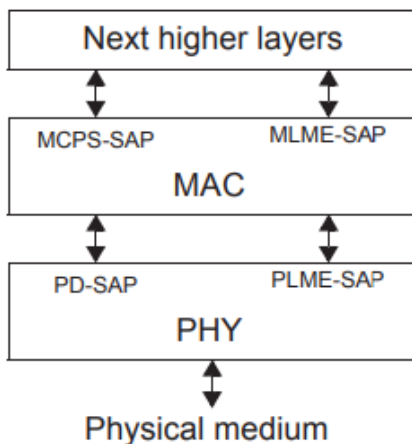
Existem três dispositivos lógicos de rede: o coordenador PAN, o roteador e o dispositivo final. O coordenador é construído a partir de um FFD e é fundamental para formar uma nova rede. Pode ter um conhecimento geral de toda a rede e é responsável pela alocação de endereços de rede.

O roteador é construído a partir de um FFD e, como o nome indica, sua função principal na rede é rotear pacotes. O terceiro dispositivo lógico é o dispositivo final, composto por RFD, geralmente se trata de um sensor ou de um atuador

### 2.4.3 Arquitetura IEEE 802.15.

Assim como é comum nas arquiteturas de redes, a arquitetura IEEE 802.14.5 é definida em termos de blocos. Esses blocos são chamados de camadas, onde cada camada é responsável por uma parte do padrão e oferece serviços a camadas superiores. Um dispositivo IEEE 802.15.4 contém pelo menos uma camada PHY, que contém o *transceiver* RF junto com seus mecanismos de controle e uma subcamada MAC que fornece acesso ao canal físico para todos os tipos de transferências. A Figura 9 apresenta esses blocos em uma representação gráfica

Figura 9 - Arquitetura de um dispositivo IEEE 802.15.4



Fonte: IEEE Std 802.15.4-2015

O bloco “*Next Higher layers*” trata das camadas superiores ao padrão, que fornecem configuração de rede, manipulação e roteamento de mensagens e uma camada de aplicação que contém as funções desejadas do dispositivo.

#### 2.4.3.1 Camada Física (PHY)

As funcionalidades da camada PHY são ativação e desativação do transceiver RF, indicação de qualidade de link (LQI), seleção de canal, transmissão e recepção de pacotes.

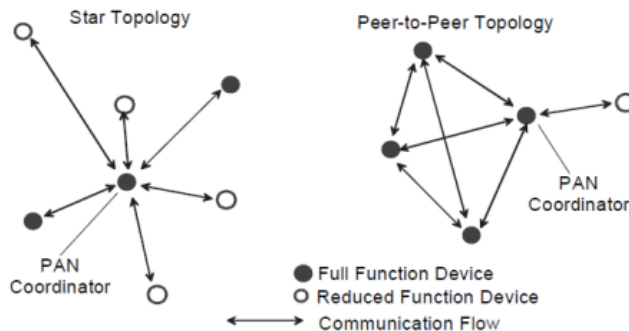
### 2.4.3.2 Camada MAC

A camada MAC 802.15.4 contém funcionalidades que permitem a transferência de dados, bem como o gerenciamento da PHY por entidades de camada superior. A subcamada MAC fornece acesso às camadas superiores através de dois Service Access Points (SAP). Os dados são gerenciados por meio do MAC-SAP, enquanto as funções de controle são acessadas por meio da interface da entidade de gerenciamento de camada MAC, chamada de MLME-SAP (ADAMS, 2006).

### 2.4.4 Topologias

Dependendo dos requisitos da aplicação, uma rede IEEE 802.15.4 pode operar em dois tipos de topologia: topologia estrela ou topologia *peer-to-peer*. Ambas as topologias são mostradas na Figura 10.

Figura 10 - Topologias de rede IEEE 802.15.4



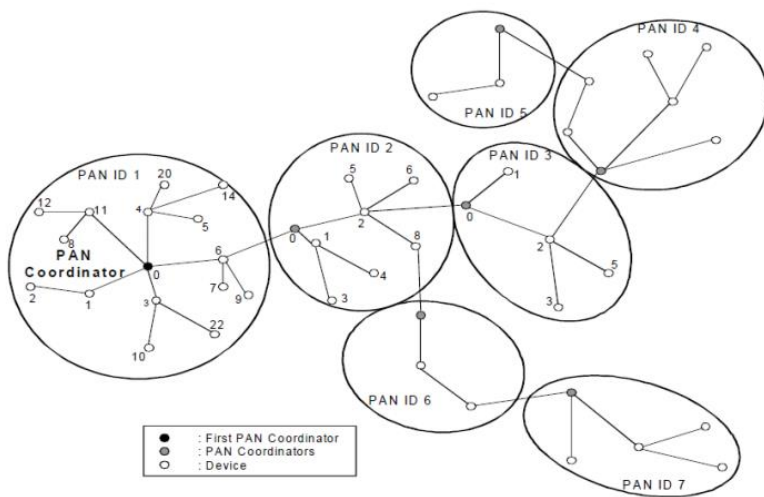
Fonte: IEEE Std 802.15.4-2015

Na topologia estrela, a comunicação é estabelecida entre os dispositivos e um único controlador central, o coordenador PAN, que é o controlador primário da rede. Redes estrelas operam de forma independente umas das outras. Isso é feito definindo um identificador PAN (PAN ID) que não está em uso por qualquer outra rede em alcance. Uma vez que o PAN ID foi selecionado, o coordenador PAN permite outros dispositivos, tanto FFD quanto RFD, a se juntarem à rede.



Na topologia *peer-to-peer* cada dispositivo é capaz de se comunicar com qualquer outro dispositivo dentro de seu alcance. Outras estruturas de rede podem ser construídas a partir dessa topologia e é possível impor restrições topológicas sob a formação dessa rede. Um exemplo de uso de topologia *peer-to-peer* é na formação de “árvores de clusters”, ou *cluster tree*. Uma *cluster tree* é um caso especial de *peer-to-peer* onde a maioria dos dispositivos são FFDs. Um RFD conecta à uma “árvore de cluster” como uma folha ao fim de um ramo porque RFDs não permitem que outros dispositivos entrem na rede. Dentro de cada “ramo”, ou cluster, existe um coordenador PAN, mas apenas um desses coordenadores é o coordenador geral da rede, potencialmente escolhido de acordo pela capacidade computacional do dispositivo. A Figura 11 mostra um exemplo de *cluster tree*.

Figura 11 - Topologia de árvore de clusters



Fonte: IEEE Std 802.15.4-201

### 3 PROJETO DE SISTEMA DE POSICIONAMENTO

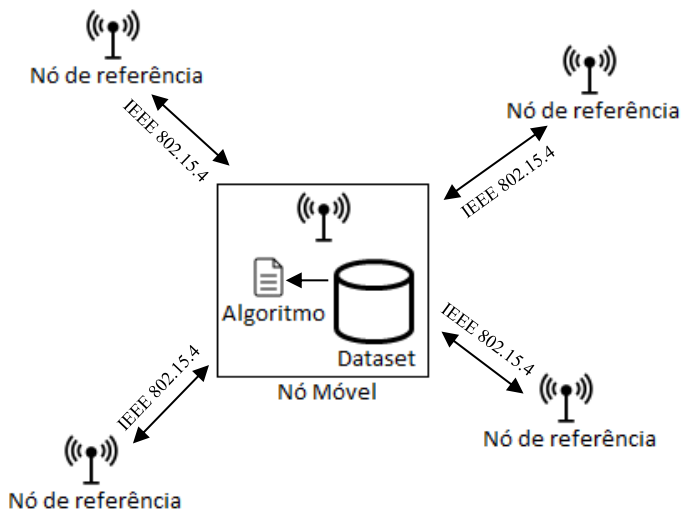
Neste capítulo é apresentada a arquitetura do sistema proposto, o seu princípio de funcionamento e a sua implementação para estudo experimental.

#### 3.1 Arquitetura do Sistema

O sistema proposto é composto de dois tipos de dispositivos de rádio, os nodos de referência e o nodo móvel. Os nodos de referência são dispositivos com posição fixa e conhecida e que tem como função transmitir sinais de rádio para o dispositivo móvel. O nodo móvel é o dispositivo cuja posição deseja-se determinar. Ele é responsável por realizar as medições de RSSI e de executar o algoritmo de predição de posição. Para este trabalho foram implementados 5 nodos de referência e 1 nodo móvel.

A topologia da rede IEEE 802.15.4 utilizada no sistema proposto é a topologia estrela representada na Figura 12, sendo o nodo móvel o coordenador PAN da rede.

Figura 12 – Representação da topologia do sistema

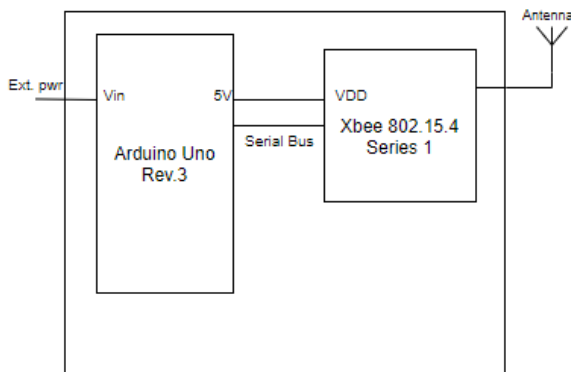


Fonte: Autor (2018)

Os dispositivos foram implementados utilizando-se os módulos de rádio Xbee 802.15.4 S1, controlados por microcontroladores Arduino UNO. Esse hardware foi escolhido devido ao baixo custo, baixo consumo e fácil programação, o que permitiu um desenvolvimento bastante rápido.

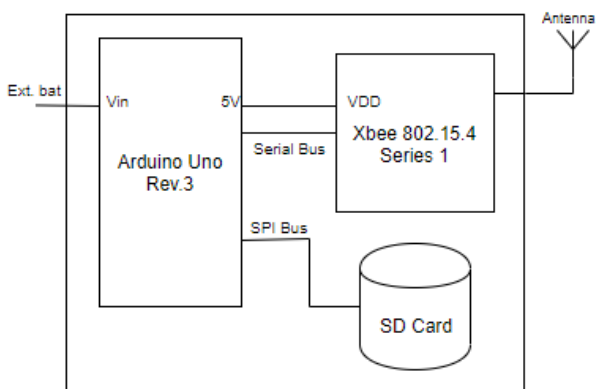
As figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, os digramas dos hardwares que implementam os dois tipos de dispositivo do sistema.

Figura 13 - Diagrama do hardware dos nodos de referência



Fonte: Autor (2018)

Figura 14 – Diagrama do hardware do nodo móvel



Fonte: Autor (2018)

Os módulos Xbee 802.15.4 S1 são pequenos módulos de rádio compatíveis com o protocolo IEEE 802.15.4, desenvolvidos pela *Digi International®* para aplicações de redes de sensores sem fio.

O cartão SD no nodo móvel tem como objetivo armazenar os dados coletados na etapa de calibração para serem utilizados nas previsões de posição durante a etapa online.

A Tabela 2 apresenta os dados técnicos dos dispositivos do sistema.

Tabela 2 - Especificações dos dispositivos

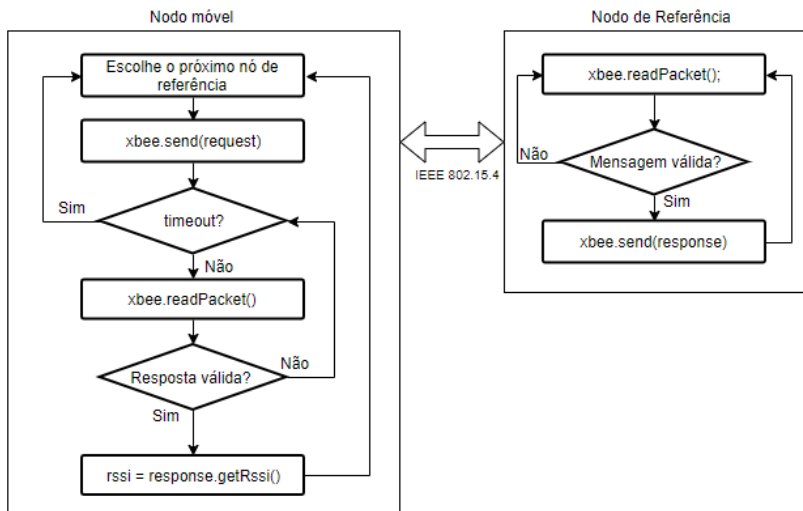
Tensão de Operação	5V
Corrente de operação	100mA
Alcance indoor	Até 10 m
Potência de Transmissão	1mW (0 dBm)
Baud Rate	9600 b/s
Sensibilidade de Recepção	-92 dBm (1% taxa de erro de pacote)
Canal de operação	15 @2,4GHz

Fonte: Autor (2018)

As medidas de RSSI são realizadas pelo próprio módulo Xbee 802.15.4 não sendo necessário nenhum hardware adicional.

No sistema proposto, as medições são realizadas de acordo com o esquema da Figura 15.

Figura 15 - Algoritmo de medição de RSSI



Fonte: Autor (2018)

Para realizar uma medida de RSSI, o nodo móvel envia uma mensagem de pedido, ou *request*, para um dos nodos de referência. Cada *request* consiste de uma mensagem de 1 byte. O dispositivo então espera até 50ms para receber uma resposta valida do nodo de referência. Ao receber a mensagem de resposta, o nodo móvel faz a leitura de RSSI. Caso não receba uma resposta a tempo, o valor de RSSI anterior é utilizado e um novo *request* é enviado para o próximo nodo de referência.

A seguir serão explicadas as duas etapas de implementação do sistema, começando pela etapa de calibração, também chamada na literatura de etapa off-line. Em seguida será apresentada a etapa operacional.

### 3.2 Etapa Off-line ou Calibração

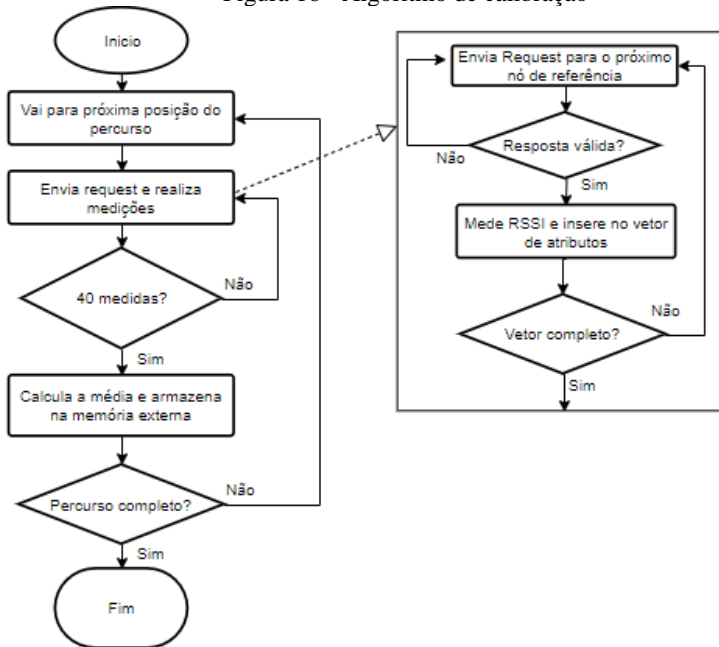
Para cada ambiente, o sistema precisa ser recalibrado, isso é, uma nova matriz de calibração deve ser construída. Essa é a etapa mais custosa de se implementar, pois requer que o projetista percorra todo o ambiente realizando medições de RSSI em posições conhecidas para construir uma tabela que relacione as medidas realizadas com suas respectivas posições no espaço. Por essa razão foi definido um procedimento para realizar toda a calibração de maneira sistemática.

A etapa de calibração consiste nos seguintes passos:

1. Definir as posições dos nodos de referência. Essas posições serão utilizadas também na etapa online.
2. Definir os pontos de calibração com o auxílio de uma planta baixa do ambiente.
3. Definir um percurso que passe por todos os pontos de calibração em uma determinada sequência.
4. Gravar o firmware de calibração e realizar o percurso com o nodo móvel.

Em cada ponto de calibração são realizadas medidas de RSSI para cada nodo de referência. Com essas medidas, constrói-se um vetor com  $n$  dimensões, onde  $n$  é o número de nodos de referência. Para tornar o sistema mais robusto à ruídos e efeitos de multipercurso utiliza-se a média de 40 vetores com valores medidos em cada posição. O algoritmo do processo de calibração está representado no fluxograma na Figura 16.

Figura 16 - Algoritmo de calibração



Fonte: Autor (2018)

Ao final da etapa de calibração tem-se uma matriz como a da Figura 17 que apresenta um trecho de uma matriz de calibração.

As colunas S1, S2, S3, S4 e S5 são as medidas dos RSSI em dBm referentes a cada um dos 5 rádios de referência; já as colunas X e Y indicam a posição bidimensional onde essas medidas foram tomadas. Portanto, cada linha é um vetor que caracteriza um ponto no espaço plano.

Figura 17 - Exemplo de Matriz de calibração

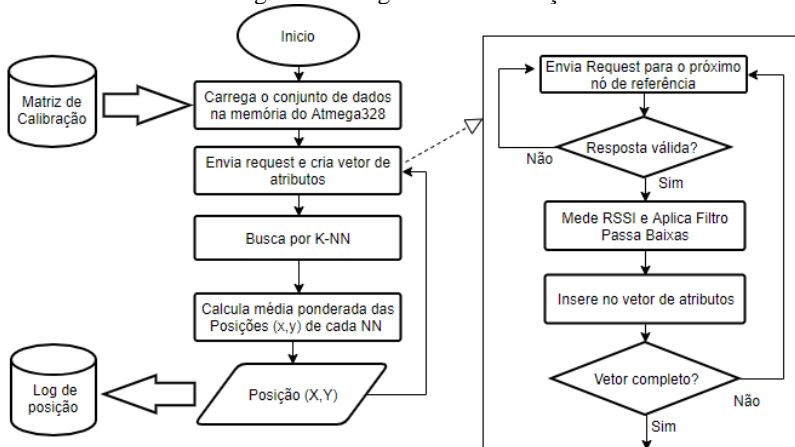
	S1	S2	S3	S4	S5	X	Y
0	63.085714	68.685714	74.600000	87.742857	79.885714	0.5	0.1
1	51.771429	59.600000	81.771429	87.314286	81.371429	0.5	1.5
2	62.857143	67.057143	77.571429	89.885714	92.714286	0.5	2.9
3	65.400000	68.057143	65.257143	87.314286	72.885714	2.0	0.1
4	64.857143	61.228571	74.257143	83.371429	79.314286	2.0	1.5

Fonte: Autor (2018)

### 3.3 Etapa Online

Uma vez que a etapa de calibração esteja concluída, o conjunto de dados é carregado na memória do nodo móvel para ser utilizado pelo algoritmo de predição de posição, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Algoritmo de Predição



Fonte: Autor, 2018

Com os nodos de referência posicionados e ativados, o nodo móvel se move livremente pelo ambiente coletando medidas de RSSI.

As medidas de RSSI são influenciadas por efeitos de multipercurso, sendo geralmente bastante ruidosas. Portanto, um filtro passa baixas do tipo média móvel exponencialmente ponderada é aplicado.

Média móvel exponencialmente ponderada é um filtro passa baixas de primeira ordem que iterativamente calcula uma média dos dados de entrada aplicando pesos que decrescem exponencialmente à medida que novos dados vão sendo introduzidos, dessa forma, dados mais recentes tem maior importância que dados mais antigos.

Esse filtro é implementado pelas equações abaixo.

$$S_n = \begin{cases} y_0, & n = 0 \\ \alpha y_n + (1 - \alpha)S_{n-1}, & n > 0 \end{cases}$$

Onde :

- $y_n$  é a entrada do filtro no instante n.
- $S_n$  é a saída do filtro no instante n
- $\alpha$  é o coeficiente de atenuação do filtro que determina a influência dos valores passados na próxima estimativa e deve ser tal que  $0 < \alpha < 1$ .

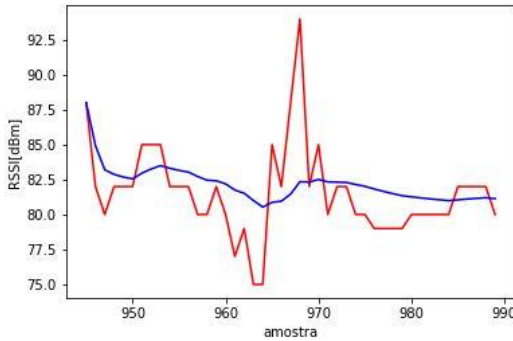
Se expandirmos a equação do filtro em si mesma para  $t$  amostras temos que a saída  $S_t$  do filtro é dada por:

$$\begin{aligned} S_t &= \alpha y_t + (1 - \alpha)S_{t-1} \\ S_t &= \alpha y_t + (1 - \alpha)\alpha y_{t-1} + (1 - \alpha)^2 S_{t-2} \\ S_t &= \alpha[y_t + (1 - \alpha)y_{t-1} + (1 - \alpha)^2 y_{t-2} + \dots + (1 - \alpha)^{t-1} y_1] + (1 - \alpha)^t y_0 \end{aligned}$$

Em outras palavras, com o passar do tempo, a saída do filtro se torna a média ponderada de um número cada vez maior de observações passadas,  $y_n$ , onde os pesos atribuídos as observações são proporcionais aos termos da progressão geométrica  $\{1, (1 - \alpha), (1 - \alpha)^2, (1 - \alpha)^3, \dots\}$ .

Na Figura 19 as medidas de RSSI, em dBm, estão representadas em vermelho enquanto que em azul é a saída de um filtro média móvel com o coeficiente  $\alpha = 0.6$ .

Figura 19 - RSSI filtrado por EWMA.



Fonte: Autor, 2018

O gráfico, construído com valores reais de RSSI medidos a 3m do transmissor, demonstra a capacidade desse simples filtro de suavizar as medidas.

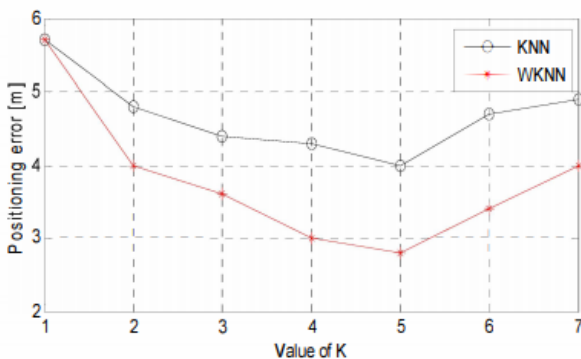


Após a aplicação do filtro, os valores de RSSI são inseridos em um vetor na posição adequada. Com o vetor completo, o nodo móvel executa o algoritmo WKNN, com  $k = 5$ , para estimar a posição.

A seleção do parâmetro  $k$  determina quantos pontos conhecidos serão considerados no cálculo da posição. Esse valor, portanto, influencia diretamente na resposta do algoritmo. No caso extremo onde  $k = 1$ , o algoritmo assume comportamento de classificador, sendo apenas capaz de estimar posições dentro do conjunto de calibração.

Com  $k > 1$  o algoritmo assume comportamento de *regressor* sendo capaz de produzir estimativas contínuas. Em Shin et al (2012), uma análise da influência do valor de  $k$  nas estimativas de posição por análise de RSSI com algoritmos KNN e WKNN, indica que  $k = 5$  produz os menores erros de posição, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Influência do parâmetro  $k$  no algoritmo



Fonte: Shin et al, 2012

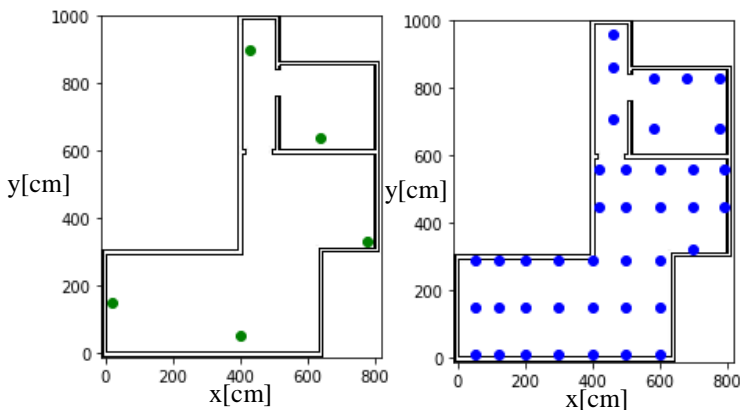
O algoritmo WKNN foi implementado em C++ pelo autor deste trabalho e utiliza como método de busca o método linear apresentado na Seção 2.3. Após a predição da posição, o valor é armazenado no cartão de memória criando um log da posição do objeto.

A seção a seguir apresenta os cenários utilizados para os testes experimentais e a metodologia para avaliação do sistema.

### 3.4 Metodologia Experimental

Para validar a arquitetura e os algoritmos propostos, o sistema foi implementado em um escritório comercial com móveis e equipamentos dispostos no espaço. A Figura 21 apresenta as dimensões do cenário em centímetros, bem como, as posições dos pontos de calibração em azul e as posições dos nodos de referência do sistema em verde.

Figura 21 - Cenário de Testes



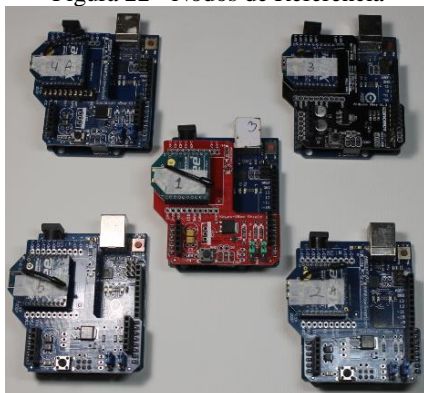
Fonte: Autor, 2018

Para poder avaliar com confiança a validade da técnica, foram utilizados 40 pontos de calibração e 5 nodos de referência, onde tanto os pontos de calibração quanto as posições dos nodos de referência foram selecionados de acordo com os estudos apresentados na Seção 2.2.

No experimento, apenas duas dimensões do espaço foram consideradas e todas as medidas foram realizadas com os dispositivos à mesma altura.

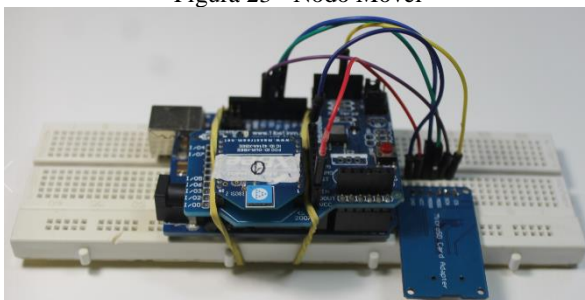
Os nodos de referência, apresentados na Figura 22, por serem dispositivos de posição fixa, foram alimentados por fontes de tensão comerciais ligadas diretamente na rede elétrica. Enquanto que o nodo móvel, Figura 23, foi alimentado por um carregador USB portátil com autonomia de 2000mAh

Figura 22 - Nodos de Referência



Fonte: Autor, 2018

Figura 23 - Nodo Móvel



Fonte: Autor, 2018

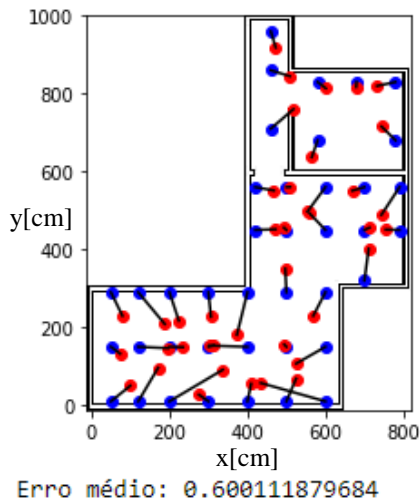
A seção a seguir apresenta os resultados obtidos nos testes experimentais. O sistema foi avaliado tanto do ponto de vista da precisão da técnica de posicionamento por análise de cena quanto do ponto de vista da sua implementação.

## 4 TESTES PRÁTICOS E RESULTADOS

A técnica de posicionamento por análise de cena foi avaliada através do cálculo do erro médio de predições realizadas sobre um conjunto de medidas de RSSI já rotuladas, isto é, com posições conhecidas. Novas medidas foram tomadas nos pontos de calibração e utilizadas para avaliar o erro médio das estimativas. O erro foi definido como a distância euclidiana entre a posição real e a posição estimada.

A Figura 24 apresenta o resultado da predição para cada ponto de calibração. Para facilitar a compreensão, cada predição, em vermelho, está ligada por uma linha à sua posição real, em azul. O erro médio calculado foi de 0.6 m.

Figura 24 - Erro sobre predição dos pontos de teste

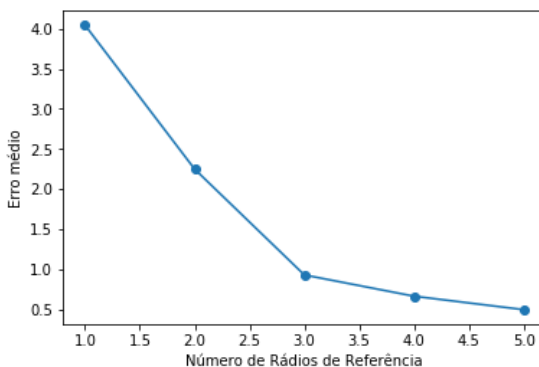


Fonte: Autor, 2018

Com erro médio de 0.6m a técnica apresentou-se bastante precisa. Contudo, é interessante analisar o comportamento da técnica sob outras configurações a fim de avaliar a sua robustez.

A Figura 25 apresenta o erro médio das predições para diferentes números de rádios de referência, mantendo o número de pontos de calibração.

Figura 25 - Influência dos nodos de referência

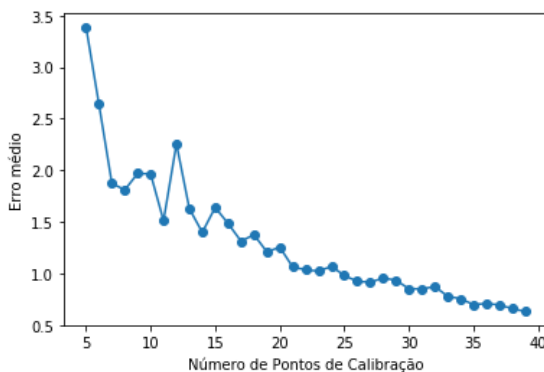


Fonte: Autor, 2018

Pode-se observar que, a partir de 4 nodos de referência, a qualidade das predições é cada vez menos influenciada pelo acréscimo de novos nodos de rádio. É importante destacar que a curva pode variar de acordo com o cenário onde o sistema é implementado. Porém essa análise é interessante pois permite redução de custos de implementação.

A Figura 26 apresenta o erro médio das estimativas para diferentes números de pontos de calibração, mantendo-se o número de nodos de referência constante. Observa-se que a partir de 35 pontos a qualidade das predições é cada vez menos influenciada pelo acréscimo de novos pontos de calibração.

Figura 26 - Influência do número de pontos de calibração

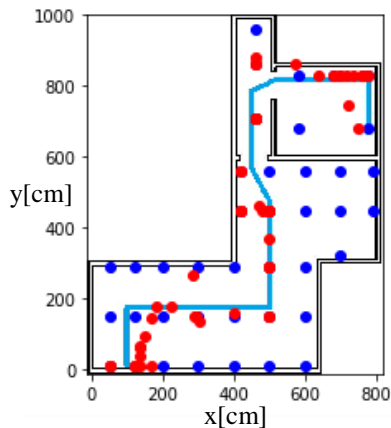


Fonte: Autor, 2018

Para o cenário deste experimento, por exemplo, seria possível obter previsões com erros abaixo de 1m com apenas 30 pontos. Essa análise é especialmente importante pois permite reduzir custos de memória e de tempo de execução do algoritmo WKNN sem influenciar de maneira expressiva a precisão do sistema.

O sistema também foi avaliado do ponto de vista de usabilidade em uma situação real. Um percurso que atravessa o ambiente foi definido e percorrido à uma velocidade aproximada de 1 m/s. A Figura 27 apresenta o percurso percorrido, em azul, e as estimativas de posição, em vermelho.

Figura 27 - Estimativas de posição ao longo do percurso

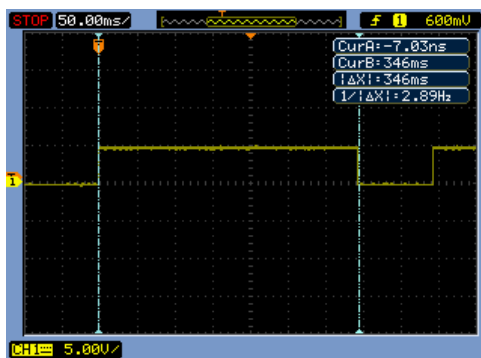


Fonte: Autor, 2018

Observa-se pela figura que, de modo geral, os pontos acompanham a trajetória percorrida. No entanto, mesmo com a aplicação de filtro digital, o estimador ainda é bastante influenciado pela alta variância nas medidas de RSSI. Nota-se, também, a baixa frequência de amostragem do sistema, o que pode influenciar na sua usabilidade quando o nodo móvel estiver em maiores velocidades de deslocamento.

A Figura 28 apresenta a medição da frequência de amostragem aproximada do sistema. Com a ajuda de um osciloscópio, foi possível medir o tempo necessário para uma previsão de posição, desde a aquisição das 5 medidas de RSSI até o fim da execução do algoritmo WKNN. O sistema leva em média 350ms para completar uma previsão, o que se traduz em uma frequência de amostragem  $f_s = 2.86Hz$ .

Figura 28 - Medição do período de amostragem do sistema



Fonte: Autor, 2018

O período de amostragem depende de uma série de fatores como latência da comunicação entre os módulos de rádio, número de nodos de referência, tamanho da matriz de calibração, algoritmo de busca utilizado, entre outros.

Além da análise de tempo de execução, também é interessante avaliar a implementação em termos de consumo de memória, pois as necessidades de memória impactam diretamente na escalabilidade da solução. A Tabela 3 compara os limites de memória do microcontrolador Arduino UNO com os requisitos de memória do sistema implementado.

Tabela 3 - Uso de memória do Arduino UNO Ver.3

Tipo de Memória	Limite	Uso
Memória de programa (Flash)	32256 bytes	10512 bytes (32%)
Memória de dados (SRAM)	2048 bytes	1453 bytes (70%)

Observa-se que o microcontrolador tem uma memória de dados bastante limitada, o que pode acarretar problemas de escalabilidade, pois para um ambiente pequeno, como o do experimento em questão, já são utilizados 70% da capacidade de memória volátil.

Para contornar o problema pode-se utilizar o cartão de memória e acessá-lo iterativamente durante a execução do algoritmo WKNN. No entanto, o acesso ao cartão de memória pode ser lento dependendo do cartão e das funções de leitura e escrita utilizadas, o que pode impactar na frequência de amostragem.





## 5 CONCLUSÃO

Os objetivos definidos no início do projeto foram todos atingidos, desde o estudo do problema de posicionamento indoor e seus requisitos até o projeto, implementação e testes práticos do sistema proposto. Com as análises e resultados obtidos é possível atestar a acurácia do posicionamento por análise de cena e também é possível observar as principais dificuldades da sua implementação prática.

No experimento realizado optou-se por utilizar um número elevado de pontos de calibração de forma que a técnica pudesse ser melhor avaliada. Dessa forma, foi possível observar predições com erro médio de 0.6 m. Contudo, as análises também revelam a relação entre acurácia, custos de implementação e escalabilidade.

O cenário do experimento pode ser considerado pequeno se comparado com outros ambientes onde esse tipo de tecnologia encontra utilidade. Em ambientes industriais, por exemplo, seria necessário um número muito elevado de pontos e de módulos de rádio para obter a mesma acurácia nas estimativas, aumentando-se consideravelmente os custos do sistema.

A escalabilidade também é afetada pelo custo computacional do algoritmo de predição, especialmente em aplicações com redes IEEE 802.15.4, onde geralmente são empregados dispositivos com poucos recursos computacionais. Um ambiente maior exige um número maior de pontos de calibração, o que aumenta as necessidades de memória e o tempo de execução do algoritmo de busca do WKNN.

No entanto, as necessidades de acurácia dependem apenas da aplicação. Dessa forma, em situações onde erros de 1 ou 2 m não afetam a usabilidade, pode-se abrir mão de acurácia para ganhar escala e reduzir custos.

Os resultados também revelam pontos interessantes para futuros desenvolvimentos. Um estudo interessante pode ser realizado sobre a utilização de outros estimadores mais sofisticados, como redes neurais ou máquina de vetores de suporte, onde a estimativa é realizada por uma função matemática ou por um sistema de equações, reduzindo consideravelmente as necessidades de memória e o tempo de execução das predições. Outra possibilidade de estudo é a pesquisa e desenvolvimento de uma estratégia de calibração dinâmica capaz de adaptar o sistema para mudanças sensíveis no ambiente, evitando o retrabalho da etapa de calibração.





## 6 REFERÊNCIAS

ADAMS, J.t.. An Introduction to IEEE STD 802.15.4. 2006 Ieee Aerospace Conference, [s.l.], v. [], n. [], p.1-8, mar. 2006. IEEE.

BARSOCCHI, P. et al. Virtual Calibration for RSSI-Based Indoor Localization with IEEE 802.15.4. 2009 Ieee International Conference On Communications, [s.l.], p.1-5, jun. 2009. IEEE.

BENGI, Yoshua; BORDES, Antoine; GLOROT, Xavier. Deep Sparse Rectifier Neural Networks. Journal Of Machine Learning Research. [s. L.], p. 315-323. 2011.

BENTLEY, Jon Louis. Multidimensional binary search trees used for associative searching. **Communications Of The Acm**, [s.l.], v. 18, n. 9, p.509-517, 1 set. 1975. Association for Computing Machinery (ACM).

BOSE, Atreyi; FOH, Chuan Heng. A practical path loss model for indoor WiFi positioning enhancement. 2007 6th International Conference On Information, Communications & Signal Processing, [s.l.], p.1-5, 2007. IEEE.

G. Mao I and B. Fidan, Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks: Monitoring and Surveillance Techniques for Target Tracking. New York, NY, USA: IGI Global, 2009.

KAEMARUNGSI, Kamol; KRISHNAMURTHY, Prashant. Analysis of WLAN's received signal strength indication for indoor location fingerprinting. Pervasive And Mobile Computing, [s.l.], v. 8, n. 2, p.292-316, abr. 2012. Elsevier BV.

KANAAN, M.; PAHLAVAN, K.. A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment. 2004 Ieee Wireless Communications And Networking Conference p.177-182, 2004. IEEE.

LARRANAGA, Janire et al. An environment adaptive ZigBee-based indoor positioning algorithm. 2010 International Conference On Indoor Positioning And Indoor Navigation, [s.l.], v. [], n. [], p.1-8, set. 2010. IEEE.

LIU, Hui et al. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *Ieee Transactions On Systems, Man And Cybernetics, Part C (applications And Reviews)*, [s.l.], v. 37, n. 6, p.1067-1080, nov. 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MOGHTADAIIEE, Vahideh; DEMPSTER, Andrew G.. Design protocol and performance analysis of indoor fingerprinting positioning systems. *Physical Communication*, [s.l.], v. 13, p.17-30, dez. 2014. Elsevier BV.

PATWARI, N. et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *Ieee Signal Processing Magazine*, v. 22, n. 4, p.54-69, jul. 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

PUCCINELLI, D.; HAENGGI, M.. Wireless sensor networks: applications and challenges of ubiquitous sensing. *Ieee Circuits And Systems Magazine*, v. 5, n. 3, p.19-31, 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

SHIN, B. et al. Enhanced weighted k-nearest neighbor algorithm for indoor wi-fi positioning systems. In: *IEEE. Computing Technology and Information Management (ICCM)*, 2012 8th International Conference on. [S.l.], 2012. v. 2, p. 574–577.

TOSCANO, Emanuele; LOBELLO, Lucia. Multichannel Superframe Scheduling for IEEE 802.15.4 Industrial Wireless Sensor Networks. *Ieee Transactions On Industrial Informatics*, [s.l.], v. 8, n. 2, p.337-350, maio 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

THRUN, Sebastian. *Probabilistic Algorithms in Robotics*. 2000. 20 f. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2000.